

金属粉末射出成形材料におけるVOF法を用いた熱流体解析

山本 圭一朗*1 田尻 智基*1 中村 憲和*2 谷川 義博*1

Computational Fluid Dynamics using VOF Method in Metal Powder Injection Molding Materials

Keiichiro Yamamoto, Tomoki Tajiri, Norikazu Nakamura and Yoshihiro Tanigawa

金属粉末射出成形 (Metal Injection Molding : MIM) は、ニアネットシェイプで製造プロセスにおけるコスト競争力強化に有効であり、更なる競争力強化には、射出成形時の流動を解析上で予測し、成形時のウェルド等の成形不良を事前に把握することが重要と考えられる。そこで、本研究では、MIM材料の射出成形時の流動解析を行うことを目的に、粘性係数を測定する装置を試作した。測定で得られた粘性係数をせん断速度と温度に依存するカラーモデルで近似し、VOF法による射出成形時の流動解析を行った。解析結果の最高充填圧力は144.3 MPaに対し、実測値は146.25 MPaであった。解析結果の方が実測値に対し、1.3 %低い値となったが、よく一致する結果が得られた。MIM材料の充填時の流動把握には、VOF法を用いた熱流体解析は有効な手法と考える。

1 はじめに

航空機部品に用いられるチタン合金等は、高価な材料であり、製造プロセスにおけるコスト競争力強化が重要となっており、原料ロスが少ないニアネットシェイプであるMIMが有効と考えられる。MIMで用いられる市販の材料(チタン合金, SUS304L等)は、図1のように、数mmサイズのペレットとして入手することができる。MIM材料は、成形時の熔融状態では非ニュートン流体であるため、流動特性を示す粘性係数はせん断速度に依存する。しかし、材料メーカーより提示されるデータシートは、限られた条件下での粘性係数を示したものであり、流動解析を行う上で十分なデータが提供されていない。



図1 市販の金属粉末成形材料

そこで、本研究では、フローマスターによりMIM材料の粘性係数を測定するのではなく、装置を試作し、せん断速度や温度をパラメータとして粘性係数を取得

した。得られた粘性係数から流動解析を行うにあたって、MIM材料は金属粉末とバインダーを混合したものであり、離散要素法 (Discrete Element Method : DEM) と数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics : CFD) を連成させることで、射出成形時の金属粒子の分布を予測できる可能性が考えられることから、樹脂流動解析ソフトウェアではなく、熱流体解析ソフトウェアを使用した。使用する熱流体解析ソフトウェアは、粘性係数を温度もしくはせん断速度のどちらか一方の依存性しか考慮できなかったため、ソフトウェアのカスタマイズを行い、VOF法 (Volume of Fluid 法)¹⁾を用いて、射出成形時の流動解析を行い、成形実験の最高充填圧力との比較を行った。

2 研究, 実験方法及び解析方法

2-1 粘性係数の測定

試作したMIM材料の粘性係数を測定する装置を図2に示す。

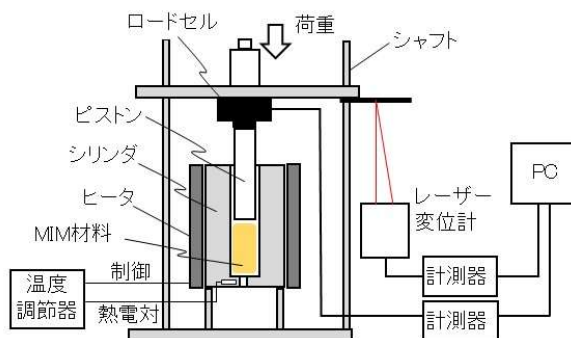


図2 試作した粘性係数測定装置構成

*1 機械電子研究所

*2 株式会社久留米リサーチ・パーク

シリンダの周囲に取り付けたヒータで加熱し、測定温度に到達した後、シリンダ内にMIM材料を入れ、荷重をかけた外径6 mmのピストンで、直径1 mm、厚さ1 mmのダイより、MIM材料を押し出す。その際の荷重をロードセルで測定し、ピストンの変位をレーザー変位計で測定した。測定では、図3のように、荷重と変位が時間とともに変化する。荷重が安定し、変位の傾きが一定となった範囲を測定データとして用いた。

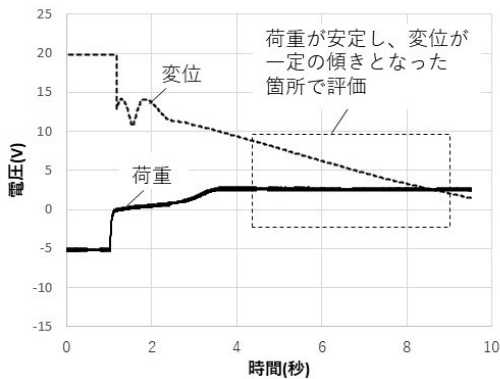


図3 測定時の変位と荷重の時間変化

ロードセルで測定した荷重及びシリンダ径と変位から容積流量を求め、式(1)、式(2)を用いてせん断応力、せん断速度を算出し、粘性係数を式(3)にて見積もった。

$$\tau = \frac{Pd}{4L} = \frac{Fd}{4LS} \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi d^3/8} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3)$$

ここで、 τ はせん断応力[Pa]、 $\dot{\gamma}$ はせん断速度[1/s]、 P は圧力[Pa]、 d はダイの直径[mm]、 L はダイの長さ[mm]、 F はピストンの荷重[N]、 S はシリンダの断面積[mm²]、 Q は容積流量[mm³/s]、 μ は粘性係数[Pa·s]である。

測定対象は、SUS304LのMIM材料とし、温度、荷重を変えて測定を行った。

2-2 熱流体解析による流動解析方法

MIM材料の流動解析を行う熱流体解析ソフトウェアには、scFLOW V2022.1 (ソフトウェアクレイドル社)を用いた。粘性係数は式(4)のカローモデル²⁾を用いることとし、粘性係数の式を、ユーザー関数として作成し、出力されたDLLファイルをソルバー計算時に

読み込むことで、温度とせん断速度に依存した粘性係数が扱えるように、カスタマイズを行った。

$$\mu = \frac{\mu_0 e^{-b(T-T_r)}}{[1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{\frac{1-n}{2}}} \quad (4)$$

ここで、 μ は粘性係数[Pa·s]、 $\dot{\gamma}$ はせん断速度[1/s]、 μ_0 は $\dot{\gamma}=1$ のときの標準粘性係数[Pa·s]、 b は温度定数[1/°C]、 T はMIM材料の温度[°C]、 T_r は参照温度[°C]、 λ は時間パラメータ[s]、 n は流れ指数である。せん断速度 $\dot{\gamma}$ は、 x 、 y 、 z 方向の流速をそれぞれ u 、 v 、 w を用いて、式(5)、(6)となる。

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\Pi} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Pi = 2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \\ + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (6) \end{aligned}$$

MIM材料を変更した場合の解析に対応するため、カローモデルの係数 μ_0 、 T_r 、 b 、 λ 、 n については、scFLOWのプリプロセッサにおける粘性係数の入力画面により、任意に入力できるようにした。

次に、カローモデルを用いた粘性係数の近似式を用いて、MIM材料の射出成形時の流動解析を行った。解析モデルは、図4に示す成形実験でMIM材料が流れる流路とした。成形実験は、JIS Z 2551「金属粉末射出成形材料—仕様」のB型引張試験片を成形するものであり、射出成形機には、(株)ソディック製TR20EHVを用いた。

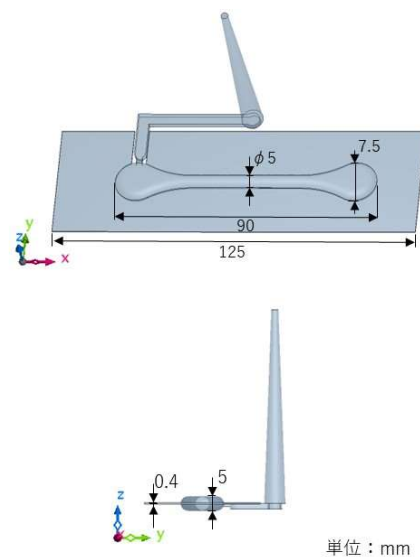


図4 解析モデル (上：斜視図，下：側面図)

成形実験での成形条件をもとに、解析条件の設定を行った。実験での射出成形では、充填完了直前に射出

速度を下げているが、解析では、射出速度の設定値から流量に換算した一定流量 $3.016 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ とし、射出温度は $190 \text{ }^\circ\text{C}$ とした。解析領域は、MIM材料が充填されるキャビティのみとし、成形時の金型温度は $60 \text{ }^\circ\text{C}$ であることから、キャビティ表面に $60 \text{ }^\circ\text{C}$ を与え、熱伝導により解析領域外へ熱移動するとした。MIM材料の充填挙動を解析するため、非定常のVOF法を用い、せん断発熱を考慮する条件とした。気相は非圧縮の空気、液相はバインダーが35 vol%，SUS304Lの金属粉末が65 vol%から構成されるものとし、液相の密度はバインダーと金属粉末の体積平均である $556 \text{ kg}/\text{m}^3$ とした。液相の熱伝導率と比熱は、フラッシュ法（ネッチ製LFA447）にて常温で測定した $2.9 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $591 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ を用いた。パーティング面から空気を逃がすこととし、一般的なエアベント隙間である $10 \text{ }\mu\text{m}$ 程度の流路³⁾にて解析を行うと、その隙間により、クーラン数の観点から時間刻みを小さく取ることになり、解析に時間を要すことになる。そこで、パーティング面に厚さ 0.4 mm の流路を設け解析を行った。キャビティ部分は、メッシュサイズ 1 mm のポリヘドラルメッシュで分割し、境界層は 0.2 mm 、変化率 1.1 で3層とした。パーティング面の厚さ 0.4 mm の流路には厚さ方向に3層の薄板状のメッシュを挿入した。

3 結果と考察

3-1 粘性係数の測定結果

SUS304LのMIM材料を測定した結果を図5に示す。横軸にせん断速度、縦軸は粘性係数である。測定結果をもとに、式(4)のカローモデルの各係数を、エクセルのソルバー機能を用いたフィッティング³⁾により求めた値も併せて示す。

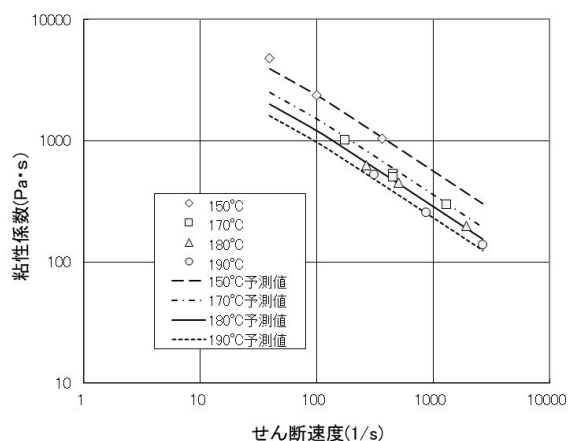


図5 SUS304LのMIM材料の測定結果

3-2 熱流体解析による流動解析結果

射出成形時における流動先端の解析結果を図6に示す。液相率0.5の表面を流動先端として示したものであり、射出開始より0.050秒、0.075秒、0.100秒、0.125秒後の流動先端の流動状況と表面温度を示す。

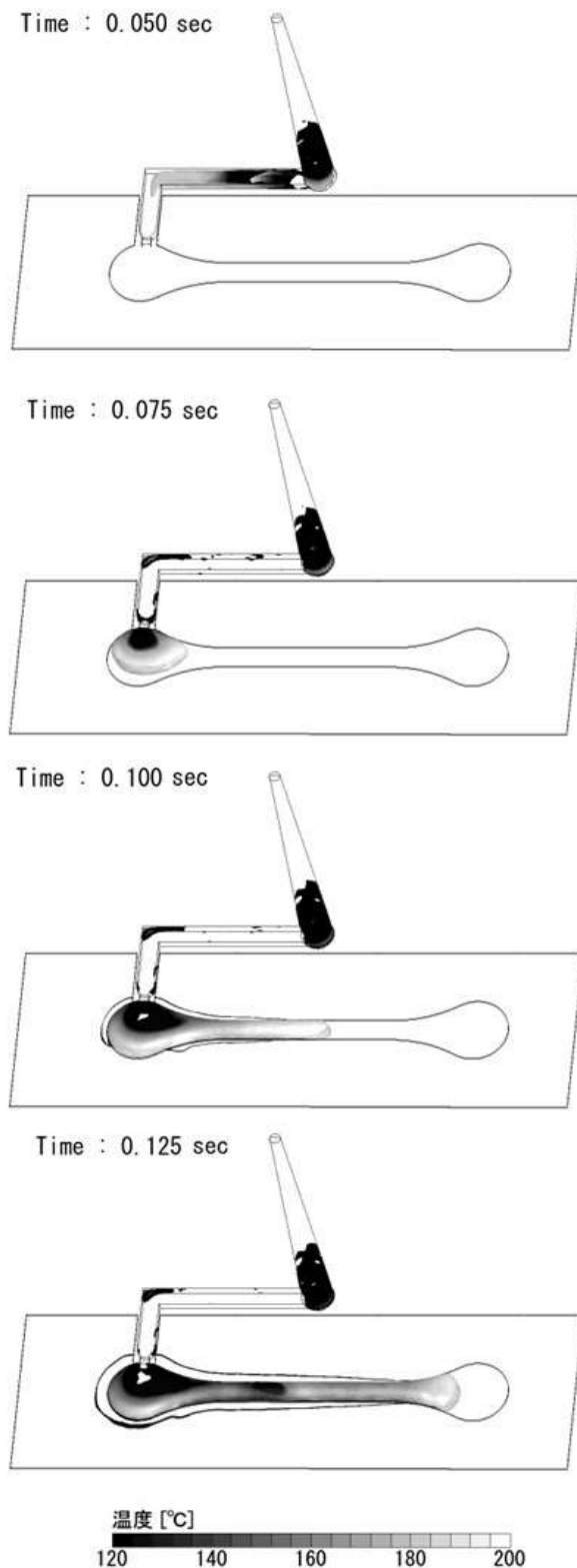


図6 解析における流動先端の状況と表面温度（上から0.050秒、0.075秒、0.100秒、0.125秒後）

MIM材料は金型の壁面に触れ、冷却されることで金型壁面近傍の粘性係数が高くなり、スキン層が形成されたような流動が模擬され、後から流れてきたMIM材料は、壁面の粘性係数が高い層間を通過し、流動先端は高温を維持したままの流動となっている様子が確認できた。

次に、流動解析結果の入口圧力の時間変化を図7に示す。解析での充填が完了した時点の圧力は159.1 MPaとなり、実測の最高充填圧力146.25 MPaに対して、8.8 %高い結果となった。成形実験では、充填完了に近づくと射出速度を下げているため、解析では、充填完了直前の時間に対する圧力の傾きが変わる0.135秒を最高充填圧力とすると、144.3 MPaとなり、実測に対し-1.3 %と、よく一致する結果が得られたと考える。

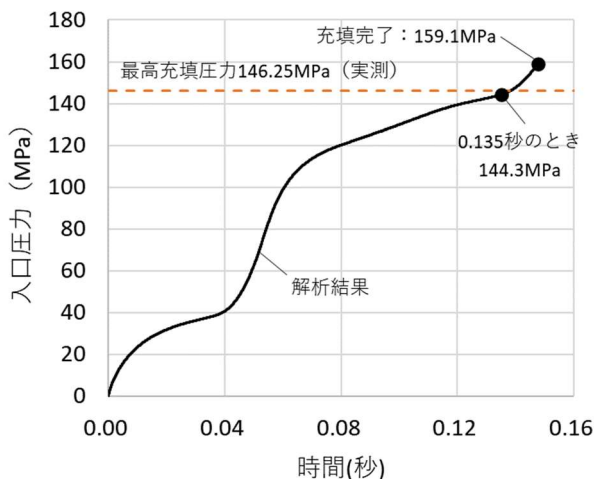


図7 成形時の圧力と解析結果の比較

4 まとめ

試作した粘性係数測定装置により、粘性係数を測定した。得られた粘性係数を近似するカラーモデルが扱えるよう、熱流体解析ソフトウェアのカスタマイズを行った。VOF法を用いて射出成形時の流動解析を行い、最高充填圧力の解析結果は144.3 MPaに対し、実測は146.25 MPaとなり、解析の方が1.3 %低いものの、よく一致する結果となった。MIM材料の充填時の流動を把握するためには、VOF法を用いた熱流体解析は有効な手法と考える。今後は、金属粉末粒子の挙動を解析できるよう、解析手法の構築に取り組んでいき、熱流体解析により、成形時の成形不良を事前に把握することを目指していく。

5 参考文献

- 1) C.W. Hirt et al. : Journal of Computational Physics, Volume 39, pp. 201-225 (1981)
- 2) 吉川秀雄 : エクセルによる樹脂流動解析, pp. 18-25, 東京図書出版(2014)
- 3) 伊藤 英樹 : 新人製品設計者と学ぶ プラスチック金型の基礎, pp. 135, 日刊工業新聞社(2011)